



EJU

REC'D 26 JUN 2000	
WIPO	PCT

BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 08 JUIN 2000

Pour le Directeur général de l'Institut
national de la propriété industrielle
Le Chef du Département des brevets

**PRIORITY
DOCUMENT**
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH RULE 17.1(a) OR (b)

Martine PLANCHE

INSTITUT
NATIONAL DE
LA PROPRIÉTÉ
INDUSTRIELLE

SIEGE
26 bis, rue de Saint Petersburg
75800 PARIS Cédex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04
Télécopie : 01 42 93 59 30





26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 93 59 30

BREVET D'INVENTION, CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété intellectuelle-Livre VI

cerja
N° 55 -1328

REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

Confirmation d'un dépôt par télécopie ☐

Cet imprimé est à remplir à l'encre noire en lettres capitales

Réservé à l'INPI

31 MAI 1999

DATE DE REMISE DES PIÈCES

N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL

DÉPARTEMENT DE DÉPÔT

DATE DE DÉPÔT

0907021

31 MAI 1999

2 DEMANDE Nature du titre de propriété industrielle

☒ brevet d'invention

☐ demande divisionnaire

☐ demande initiale

☐ certificat d'utilité

☐ transformation d'une demande de brevet européen

☐ brevet d'invention

n° du pouvoir permanent

références du correspondant

téléphone

B4297

04 76 51 84 51

date

Établissement du rapport de recherche

☐ différé

☒ immédiat

Le demandeur, personne physique, requiert le paiement échelonné de la redevance

☐ oui

☒ non

Titre de l'invention (200 caractères maximum)

MESURE DE VITESSE D'UNE COULÉE MÉTALLURGIQUE

3 DEMANDEUR(S)

n° SIREN

code APE-NAF

Nom et prénoms (souligner le nom patronymique) ou dénomination

CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Forme juridique

Etablissement Public

Nationalité(s) Française

Adresse(s) complète(s)

3, Rue Michel Ange 75794 PARIS CEDEX 16

Pays

FRANCE

4 INVENTEUR(S) Les inventeurs sont les demandeurs

☐ oui

☒ non

En cas d'insuffisance de place, poursuivre sur papier libre
Si la réponse est non, fournir une désignation séparée

5 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES

☐ requête pour la 1ère fois

☐ requête antérieurement au dépôt ; joindre copie de la décision d'admission

6 DÉCLARATION DE PRIORITÉ OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE LA DATE DE DÉPÔT D'UNE DEMANDE ANTÉRIEURE

pays d'origine

numéro

date de dépôt

nature de la demande

7 DIVISIONS antérieures à la présente demande n°

date

n°

date

8 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE

(nom et qualité du signataire - n° d'inscription)

Michel de Beaumont
Mandataire n°92-1016

SIGNATURE DU PRÉPOSÉ À LA RÉCEPTION

D.R.G.R.

SIGNATURE APRES ENREGISTREMENT DE LA DEMANDE A L'INPI



BREVET D'INVENTION, CERTIFICAT D'UTILITE

DÉSIGNATION DE L'INVENTEUR

(si le demandeur n'est pas l'inventeur ou l'unique inventeur)

DIVISION ADMINISTRATIVE DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg
75800 Paris Cedex 08
Téléphone : 01 53 04 53 04 Télécopie : 01 42 93 59 30

N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL

90 7021

TITRE DE L'INVENTION :

MESURE DE VITESSE D'UNE COULÉE MÉTALLURGIQUE

LE(S) SOUSSIGNÉ(S)

CABINET MICHEL DE BEAUMONT
1 rue Champollion
38000 Grenoble

DÉSIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) (indiquer nom, prénoms, adresse et souligner le nom patronymique) :

Marcel Garnier, 701, Chemin de la Grivolée, SAINT MARTIN D'URIAGE 38410 URIAGE, FRANCE

Roland Ernst, 8, Rue Pasteur, 38610 GIERES, FRANCE

INPI GRENOBLE 3 1 MAI 1999

NOTA : A titre exceptionnel, le nom de l'inventeur peut être suivi de celui de la société à laquelle il appartient (société d'appartenance) lorsque celle-ci est différente de la société déposante ou titulaire.

Date et signature(s) du (des) demandeur(s) ou du mandataire
Le 28 mai 1999
B4297

Michel de Beaumont
Mandataire n°92-1016

A. 34

MESURE DE VITESSE D'UNE COULÉE MÉTALLURGIQUE

La présente invention concerne le domaine des installations métallurgiques et, plus particulièrement, les installations de coulée continue d'un métal liquide dans une lingotière.

La figure 1 représente, de façon très schématique et
5 partiellement par une vue en perspective, la section d'entrée d'une lingotière 1 de coulée continue métallurgique. La lingotière comprend essentiellement un moule 2, ouvert à ses deux extrémités dans le cas d'une coulée continue. Le métal liquide est amené dans la lingotière par une buse 3 immergée, plongeant
10 dans le moule 2. La buse 3 présente des ouïes latérales 4 qui ont pour but de donner une composante horizontale à la vitesse du métal liquide en sortie de la buse 3.

La figure 2 est une vue en coupe schématique d'une lingotière classique 1 illustrant, par des flèches, les mouvements
15 du métal liquide dans la section d'entrée du moule 2. Comme l'illustre cette figure 2, la composante horizontale, donnée par les ouïes 4 de la buse 3 à la vitesse du métal liquide, a pour effet de limiter la profondeur verticale de pénétration du jet d'alimentation de métal dans le moule 2. Le métal liquide 1 est issu,
20 par exemple, d'un creuset 5 (par exemple, du type haut fourneau). Dans l'exemple représenté à la figure 2, le creuset 5 comporte, dans sa partie inférieure, un orifice 6 associé à un moyen d'ob-

turation commandable 7 pour commander le déversement du métal liquide dans la buse 3. Dans les installations classiques, la vitesse du métal liquide en sortie de la buse 3 peut atteindre plusieurs mètres par seconde. Il est donc important de pouvoir
5 contrôler la pénétration du métal liquide dans la coulée. En effet, une trop grande pénétration de ce métal liquide pose plusieurs problèmes. Parmi ceux-ci, on notera un entraînement de particules non-métalliques provenant de la poudre ou peau (non représentée) qui recouvre le lingot 8 coulé dans le moule 2. Ces
10 particules se trouvent piégées dans le métal obtenu. Une trop grande pénétration du métal liquide entraîne également un gradient thermique inversé puisque le métal liquide chaud affecte les régions profondes de la coulée et provoque, notamment, une refusion locale en profondeur du lingot solidifié au moins par-
15 tiellement, ce qui nuit également à la qualité du produit.

Pour limiter la vitesse du métal liquide, on a recours à des systèmes de freinage et, en particulier, à des systèmes de frein électromagnétique.

Un premier type de frein électromagnétique utilise un
20 champ magnétique continu dans une direction perpendiculaire à la vitesse de l'écoulement du métal, ce qui donne naissance à des courants induits. Ces courants induits interagissent avec le champ magnétique appliqué et engendrent une force électromagnétique qui est une force de freinage visant à annuler la vitesse à
25 l'origine des courants induits. De tels systèmes à champ magnétique continu sont généralement constitués d'un électro-aimant entourant totalement ou partiellement la lingotière, et qui produit un champ magnétique transversal au métal liquide. De tels systèmes ont l'inconvénient d'être passifs, c'est-à-dire que le
30 champ magnétique est de géométrie et de position fixées une fois pour toutes, ce qui entraîne que tout écart à un point de fonctionnement donné réduit l'efficacité du freinage. Par conséquent, ce freinage se révèle inefficace lorsque les conditions d'alimentation (vitesse, forme de la buse, profondeur d'immersion des
35 ouïes de la buse, etc.) changent.

Une deuxième catégorie de freins électromagnétiques dits à champ glissant utilise un champ magnétique alternatif produit par une alimentation polyphasée appliquée à des inducteurs présentant une répartition spatiale adaptée. Le champ magnétique est ainsi animé d'un mouvement de rotation ou de translation selon que la forme de l'inducteur est cylindrique ou plane. De tels champs magnétiques permettent d'accélérer ou de freiner les écoulements du métal liquide dans la coulée continue métallurgique. Le système est ici actif puisque l'effet mécanique induit dans le métal liquide est indépendant de la vitesse liquide et se trouve donc contrôlée par l'opérateur.

La présente invention concerne, plus particulièrement, les installations de coulée continue équipées d'un système de frein électromagnétique à champ magnétique glissant.

En pratique, dans les installations industrielles de coulée continue métallurgique, un frein à champ magnétique glissant se compose de quatre inducteurs à champ glissant associés par paire de chaque côté du moule 2 de la lingotière. A la figure 1, deux de ces inducteurs ont été illustrés de façon schématique et désignés par la référence 9. A la figure 2, ces deux inducteurs ont été illustrés en pointillés. D'un même côté de la lingotière, les deux inducteurs sont, comme l'illustre la figure 1, disposés symétriquement par rapport à l'axe de la buse 3 de part et d'autre de celle-ci pour équilibrer la distribution du métal.

Un exemple de système de frein électromagnétique dans une installation de coulée continue métallurgique est décrit, par exemple, dans la demande de brevet européen N° 0550785 dont le contenu est incorporé ici par référence.

Un problème qui se pose est que la géométrie des ouïes 4 de la buse 3 évolue dans le temps, en particulier, en raison d'une érosion de ces ouïes par l'écoulement rapide de l'acier liquide dans la buse. Cette érosion n'évolue pas forcément de façon symétrique, ce qui entraîne alors une dissymétrie hydrodynamique dans la lingotière en raison d'un écoulement plus important d'un côté de la buse 3 par rapport à l'autre. Un tel

déséquilibre est nuisible à la qualité du produit fini car il conduit non seulement à l'introduction de particules non métalliques provenant de la peau du métal liquide mais également à des durées de solidification différentes d'un côté à l'autre du lingot formé.

Il serait donc souhaitable de pouvoir différencier les actions des inducteurs 9 de champ magnétique glissant pour rétablir l'équilibre de l'injection dans la lingotière.

Pour cela, on pourrait penser alimenter les quatre inducteurs de façon séparée de façon à fournir de nombreuses combinaisons dans l'organisation des mouvements du métal liquide. En particulier, on pourrait alors individualiser le freinage des jets de métal liquide d'un côté ou de l'autre de la buse 3.

Toutefois, l'individualisation théorique des effets des différents inducteurs sur la coulée de métal pose des problèmes de mise en pratique liés, en particulier au besoin de connaître alors la vitesse réelle de la coulée de métal à un instant donné. De plus, cette vitesse courante d'injection du métal doit être connue de part et d'autre de la buse 3.

Une méthode classique pour régler le champ électromagnétique glissant dans une lingotière du type de celle illustrée par les figures 1 et 2 consiste à modéliser l'écoulement dans une structure de test utilisant, par exemple, de l'eau pour fixer la fréquence d'excitation des inducteurs. Une telle méthode est décrite en particulier dans la demande de brevet européen N° 0550785 déjà mentionnée.

Il est clair qu'une telle méthode ne peut pas permettre de connaître en temps réel la vitesse de l'écoulement à travers les deux ouïes 4 de la buse 3 et, plus particulièrement, à détecter un déséquilibre dans cet écoulement.

Une première solution pour connaître cette vitesse serait d'utiliser des jauges de contrainte fixées à des tiges plongées dans l'acier liquide de la lingotière. En mesurant un signal relié à l'effort hydrodynamique exercé par l'acier liquide sur les tiges, on peut alors détecter toute dissymétrie d'écou-

ment et, par conséquent, le cas échéant corriger celle-ci par modification de la puissance injectée dans les inducteurs 9. Toutefois, le recours à des tiges, par exemple d'alumine, pose plusieurs problèmes.

5 Un premier problème est que ces tiges constituent un élément intrusif dans la lingotière qui est susceptible d'introduire des pollutions dans le produit obtenu, en particulier, par une érosion des tiges liée à la coulée de métal liquide.

10 Un autre inconvénient est que l'usure par érosion de ces tiges de mesure rend cette solution, en pratique, difficilement viable économiquement en raison de la consommation alors importante des tiges d'alumine dans un processus industriel.

15 La présente invention vise à pallier les inconvénients des installations de coulée continue métallurgique classiques. L'invention vise, plus particulièrement, à permettre une commande individualisée des inducteurs d'un frein électromagnétique à champ glissant d'une telle installation.

20 La présente invention vise également à proposer une solution qui n'entraîne aucune pollution du métal liquide en cours de coulée.

L'invention vise également à proposer une solution qui soit particulièrement économique et ne nécessite pas de maintenance en matériau consommable.

25 La présente invention vise en outre à proposer une solution qui soit particulièrement adaptée à un asservissement individualisé des puissances injectées dans les inducteurs générant le champ magnétique glissant.

30 Pour atteindre ces objets, la présente invention prévoit un procédé de mesure de la vitesse d'écoulement d'un métal liquide en fusion dans une lingotière équipée d'un frein électromagnétique à champ glissant, consistant à mesurer la tension ou le courant d'au moins une source d'alimentation du frein électromagnétique et à extraire la vitesse d'écoulement de cette information.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, le procédé est appliqué à un frein électromagnétique dont au moins un inducteur comprend deux paquets de plusieurs conducteurs dans une direction verticale, et consiste à appliquer, pour
5 chaque conducteur, la relation suivante :

$$\text{grad}V = -i(\omega - vk)A - \rho j ,$$

où ω représente la pulsation d'excitation alternative du champ glissant, où v représente la vitesse du métal, où k représente le nombre d'ondes du champ magnétique glissant inducteur, où A
10 représente le potentiel vecteur, où ρ représente la résistivité du métal, où j représente la densité de courant d'excitation du conducteur, et où V représente la tension aux bornes de l'inducteur.

Selon un mode de réalisation de la présente invention,
15 la mesure de vitesse est utilisée pour asservir l'excitation des inducteurs sur une valeur prédéterminée.

La présente invention prévoit aussi un procédé de régulation d'une vitesse de coulée continue d'un métal en fusion dans une lingotière, consistant à asservir la tension ou le courant
20 d'au moins une source d'alimentation d'un frein électromagnétique à champ glissant comportant plusieurs inducteurs, sur une mesure du courant ou de la tension dans chaque inducteur.

La présente invention prévoit aussi une installation de coulée continue du type utilisant un frein électromagnétique à
25 champ glissant pour organiser l'écoulement d'un métal liquide délivré par deux ouïes d'une buse, caractérisée en ce que chaque inducteur du frein électromagnétique est alimenté par un circuit individuel ; et en ce que l'installation comporte des moyens pour réguler la tension ou le courant d'alimentation de chaque inducteur
30 afin de maintenir les vitesses d'écoulement du métal liquide équilibrées entre les deux ouïes.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, chaque circuit d'alimentation de chaque inducteur comprend ses propres moyens de régulation de la puissance d'excitation
35 électromagnétique de cet inducteur.

Selon un mode de réalisation de la présente invention, l'installation comprend une centrale de commande des circuits d'alimentation des différents inducteurs pour réguler la vitesse d'écoulement du métal liquide.

5 Ces objets, caractéristiques et avantages, ainsi que d'autres de la présente invention seront exposés en détail dans la description suivante de modes de réalisation particuliers faite à titre non-limitatif en relation avec les figures jointes parmi lesquelles :

10 les figures 1 et 2 qui ont été décrites précédemment représentent un exemple d'installation de coulée métallurgique continue du type auquel s'applique la présente invention ;

la figure 3 représente, de façon très schématique, les positions respectives des inducteurs dans un système de coulée
15 continue auquel s'applique la présente invention ;

la figure 4 est une vue de dessus d'une lingotière équipée d'un système d'asservissement de vitesse de coulée selon l'invention ; et

la figure 5 représente, de façon schématique, un mode
20 de réalisation d'un circuit de commande d'un inducteur selon l'invention.

Les mêmes éléments ont été désignés par les mêmes références aux différentes figures. Pour des raisons de clarté, seuls les éléments qui sont nécessaires à la compréhension de l'inven-
25 tion ont été représentés aux figures et seront décrits par la suite. On pourra se référer à la littérature, en particulier à la demande de brevet européen N° 0550785, pour la constitution d'une installation de coulée continue à frein électromagnétique actif à champ glissant, l'invention ne modifiant pas la structure des
30 installations classiques.

Une caractéristique de la présente invention est de tirer profit d'une alimentation individuelle des différents inducteurs d'un frein électromagnétique à champ glissant pour extraire, des caractéristiques électriques de cette alimentation

des inducteurs, une information relative à la vitesse d'écoulement du métal liquide dans la lingotière.

Selon la présente invention, on utilise le fait que les courants induits par le métal liquide conducteur dans le champ magnétique créé par les inducteurs dépendent, entre autres, de la vitesse d'écoulement du métal liquide. En particulier, en supposant que le système est stabilisé pour une vitesse de métal correspondant à un régime permanent d'écoulement du métal liquide, une perturbation quelconque qui entraîne une variation de cette vitesse se traduit par une variation de l'impédance du ou des inducteurs sensibles au courant induit correspondant. Ainsi, selon la présente invention, on utilise pour alimenter les inducteurs, une source d'alimentation constante soit en courant soit en tension, et on examine la variation éventuelle de l'autre grandeur (tension ou courant) pour en déduire une variation de la vitesse d'écoulement du métal liquide. De plus, cette vitesse peut être localisée à partir du moment où les inducteurs sont alimentés séparément les uns des autres. Cette information peut, dans un mode de réalisation préféré, être utilisée en contre-réaction d'un système d'asservissement de l'alimentation des différents inducteurs afin d'asservir la vitesse d'écoulement du métal sur un point d'équilibre correspondant à une consigne de vitesse donnée, par exemple, calculée à partir d'une modélisation telle que décrite dans la demande de brevet européen N° 0550785.

La figure 3 illustre, de façon très schématique, la position de quatre inducteurs dans une installation de coulée continue. Par souci de simplification, seuls les inducteurs 9 ainsi qu'un parallélogramme symbolisant le métal liquide 1 entre ces inducteurs ont été représentés.

De façon classique, chaque inducteur 9 est constitué de plusieurs ampères/tours imbriqués propres à être respectivement alimentés par des phases différentes. Dans l'exemple de la figure 3, on a supposé un système de frein électromagnétique diphasé. Chaque inducteur 9 comporte donc deux circuits, respectivement 10 et 11, d'ampères-tours conducteurs imbriqués dans une culasse

magnétique 12 opposée au métal $\underline{1}$ par rapport au plan x-z dans lequel s'inscrivent les circuits conducteurs 10 et 11. Un premier circuit conducteur 11 correspondant à une première phase est constitué de trois paquets de conducteurs 13, 14, 15. Le nombre de conducteurs du paquet central 15 correspond au double du nombre de conducteurs des paquets 13 et 14 qui encadrent deux paquets 16, 17 de conducteurs du deuxième circuit 10 destinés à être alimentés par la deuxième phase de l'alimentation diphasée. Pour former les ampères-tours adaptés, les paquets de conducteurs sont reliés directement par phase à une de leur extrémité et, par l'intermédiaire de la source d'alimentation (non représentée à la figure 3), à leurs autres extrémités respectives. Ainsi, dans l'exemple de la figure 3 où les axes, respectivement, vertical \underline{z} dans le sens de la coulée, et horizontaux \underline{x} , \underline{y} respectivement dans la plus grande direction du métal liquide $\underline{1}$ correspondant à l'alignement des ouïes (4, figure 1) de la buse d'injection et dans la plus petite direction du métal liquide $\underline{1}$, les paquets de conducteurs des différents inducteurs sont dans la direction verticale \underline{z} . Ils sont, par exemple, reliés en direct par leurs extrémités inférieures respectives. Par le raccordement des paquets de conducteurs, les ampères-tours sont traversés par un courant qui, dans les tronçons verticaux, se trouvent inversés selon qu'il s'agit des conducteurs 13, 14 ou 15 pour le premier circuit 11, et 16 ou 17 pour le deuxième circuit 10. Afin d'illustrer cette circulation dans des sens opposés, on a indiqué un exemple de circulation de courant à la figure 3, symbolisé par un "." ou une "x" selon le sens de circulation dans les tronçons verticaux.

L'organisation des circulations de courant telle qu'illustrée à la figure 3 est parfaitement classique et ne sera pas détaillée plus avant. On notera simplement que l'invention peut être mise en oeuvre dans un système comportant un plus grand nombre de phases, par exemple dans un système triphasé ou polyphasé de nombre supérieur en respectant l'imbrication habituelle des phases pour obtenir un système de champ glissant polyphasé. On

notera également que, comme l'illustrent les représentations des sens de circulation de courant à la figure 3, l'axe x correspond à un axe de symétrie longitudinale qui est en fait un axe d'anti-symétrie pour les inducteurs 9 qui se font face deux à deux.

5 Dans un système de frein électromagnétique à champ glissant tel qu'illustré par les figures précédentes, on peut considérer que le potentiel vecteur A , la densité de courant j , et le champ électrique E ont une seule composante suivant l'axe vertical z , que la vitesse du métal induit y a une seule compo-
10 sante suivant l'axe longitudinal x , et que l'induction magnétique B a deux composantes selon les axes horizontaux x et y .

La vitesse de synchronisme v_s du champ électro-
magnétique glissant est égale au produit de la fréquence f de
fonctionnement de l'excitation alternative des deux phases par la
15 longueur d'onde λ de l'onde de champ glissant. On notera que la vitesse réelle y du métal est opposée à cette vitesse de synchro-
nisme qui ne comprend également qu'une seule composante selon
l'axe longitudinal x .

Les équations qui régissent le fonctionnement du frein
20 électromagnétique, respectivement dans l'inducteur, dans l'air, dans la culasse magnétique et dans le métal induit peuvent s'ex-
primer de la façon suivante en projection sur l'axe vertical z où l'inconnue unique est la composante A suivant Oz du potentiel
vecteur \vec{A} .

25 Dans l'inducteur, on peut écrire :

$$-\operatorname{div}\left[\frac{1}{\mu_0}(\overrightarrow{\operatorname{grad}A})\right]=J_i,$$

où J_i représente la densité de courant imposé dans l'inducteur par l'alimentation, et où μ_0 représente la perméabilité du vide.

Dans l'air, on peut écrire :

30
$$-\operatorname{div}\left[\frac{1}{\mu_0}(\overrightarrow{\operatorname{grad}A})\right]=0.$$

Dans la culasse magnétique, on peut écrire :

$$-\operatorname{div}\left[\frac{1}{\mu_0\mu_r}(\overrightarrow{\operatorname{grad}A})\right]=0,$$

où μ_r est la perméabilité relative du milieu magnétique.

Dans le métal induit, on peut écrire :

$$-\text{div} \left[\frac{1}{\mu_0} (\overrightarrow{\text{grad}} A) \right] = -i \frac{\omega}{\rho} A - \frac{v}{\rho} \frac{\partial A}{\partial x},$$

5 où ω représente la pulsation électrique de l'alimentation alternative ($\omega = 2\pi f$), et où ρ représente la résistivité du métal liquide.

En première approximation, on peut, afin de négliger les effets de bord, considérer que le potentiel vecteur A est une onde glissante due à une nappe inductrice infiniment longue suivant la direction longitudinale x . On peut alors considérer que la seule composante A du potentiel vecteur suivant l'axe vertical z peut s'écrire sous la forme :

$$A = A_0 e^{i(\omega t - kx)},$$

15 où k représente le nombre d'ondes du champ magnétique glissant inducteur ($k = 2\pi/\lambda$).

Avec cette approximation, la relation précédente dans le métal induit peut s'exprimer en projection sur l'axe vertical comme étant égal à :

$$-\text{div} \left[\frac{1}{\mu_0} (\overrightarrow{\text{grad}} A) \right] + \frac{i}{\rho} (\omega - vk) A = 0.$$

20 En introduisant la vitesse de synchronisme de l'inducteur dans cette équation, on obtient :

$$-\text{div} \left[\frac{1}{\mu_0} (\overrightarrow{\text{grad}} A) \right] + i \frac{2\pi}{\lambda \rho} (v_s - v) A = 0.$$

Toutes les expressions ci-dessus montrent que les seules grandeurs variables pour un courant donné sont le potentiel A et la vitesse v du métal liquide.

25 On notera que plutôt que le courant, c'est la densité de courant qui doit être fixée. Cependant, le nombre de conducteurs par paquet (c'est-à-dire le nombre de spires) n'a pas d'incidence dans la mesure où on va comparer de manière relative la variation de tension de chaque phase pour une variation de

30 vitesse du métal.

On peut donc calculer, à partir des valeurs respectives du potentiel vecteur A , de la densité de courant imposé j , et des relations établies précédemment, le gradient de tension $\text{grad}V$ sur ces conducteurs.

5 En projetant, sur l'axe vertical z , l'équation de Maxwell suivante :

$$\vec{j} = \sigma \left(-i\omega \vec{A} + \vec{v} \times \vec{B} - \vec{\text{grad}}V \right) = \sigma \left(-i\omega \vec{A} + \vec{v} \times \text{rot} \vec{A} - \vec{\text{grad}}V \right)$$

qui relie les grandeurs j , $\text{grad}V$ et A , et en remplaçant $\vec{v} \times \text{rot} \vec{A}$ par $ivkA$, on obtient la relation suivante donnant le

10 gradient de la tension sur chaque conducteur :

$$\text{grad}V = -i(\omega - vk)A - \rho j.$$

Il suffit alors de sommer les valeurs obtenues pour tous les conducteurs de chaque paquet afin d'obtenir la tension totale des phases respectives. Si besoin est, on peut en déduire

15 l'impédance de chaque phase plutôt que la tension en divisant cette tension par les courants imposés par les sources de courant 31 et 32.

A titre d'exemple particulier de réalisation, en prenant pour chaque paquet de conducteurs, un rectangle de

20 $160 \times 100 \text{ mm}^2$ (à l'exception des paquets 13 et 14 d'extrémité qui correspondent chacun à un rectangle de $80 \times 100 \text{ mm}^2$), la densité de courant vaut $6,75 \cdot 10^6$ ampères efficaces par m^2 . En supposant une perméabilité relative μ_r de 1000, la longueur d'onde λ du champ glissant est alors d'environ 1,3 m. Pour une fréquence de fonc-

25 tionnement de, par exemple, 0,65 Hz, la vitesse de synchronisme v_s est alors de 84,5 cm/s.

En considérant de manière simplifiée que le métal induit est un solide de résistivité constante $\rho = 100 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$ (ce qui correspond à une conductivité de $1 \cdot 10^6 / (\Omega\text{m})^{-1}$, soit sensiblement celle de l'acier liquide), on peut calculer, pour deux modu-

30 les de vitesse du métal liquide de 10 et de 9 cm/s, les valeurs respectives de la tension totale pour les paquets de conducteurs. Par exemple, pour des paquets 16 et 17 de 40 conducteurs de section carrée de $20 \times 20 \text{ mm}^2$ en série, ce qui revient à considérer

des paquets de 40 spires dans chacun desquelles passe un courant de 2700 A efficace, on obtient des tensions de 38,66 volts et de 36,74 volts en module pour, respectivement, 10 cm/s et 9 cm/s. Par conséquent, la tension de la phase correspondante diminue en module d'environ 2/38, soit environ 5 %. Sur l'impédance de la phrase correspondante, la variation est également de l'ordre de 5 % pour une même variation de vitesse du métal.

Par conséquent, on peut considérer qu'avec des valeurs industrielles, une variation de l'ordre de 10 % de vitesse du métal se traduit par une variation de l'ordre de 5 à 6 % sur la tension et sur l'impédance. Cette variation est assez sensible pour être utilisée pour commander les circuits de régulation de manière à ramener la vitesse à sa valeur moyenne de consigne, ou à ramener à zéro un écart entre deux valeurs.

La figure 4 illustre, par une vue de dessus d'une lingotière, les raccordements électriques respectifs selon l'invention des inducteurs diphasés illustrés par la figure 3. Les connexions directes entre les différents paquets de conducteurs, par exemple, dans la partie inférieure du système, ont été symbolisées par des pointillés.

S'agissant d'une vue de dessus, la buse 3 a été représentée schématiquement à la figure 4 au centre du moule 2. Chaque inducteur 9 a été symbolisé par sa culasse magnétique 12 et ses deux circuits conducteurs 10, 11 constitués, dans la direction verticale, respectivement de deux paquets 16, 17 d'un même nombre de conducteurs et de trois paquets 13, 14, 15, le paquet central 15 ayant un nombre de conducteurs double de celui des paquets d'extrémité 13 et 14.

Comme cela a été indiqué précédemment, les tronçons 16 et 17 de chaque circuit 10 sont reliés directement, par exemple, par un câble 18 en partie inférieure. De même, les paquets 13 et 14 sont chacun reliés au paquet 15, par exemple, par des câbles, respectivement 19 et 20. En partie supérieure des paquets conducteurs verticaux, ceux-ci sont reliés par leurs extrémités à des moyens d'alimentation. Selon l'invention, les circuits conduc-

teurs 10 et 11 de chaque inducteur 9 sont reliés individuellement à un circuit d'alimentation 21 propre à l'inducteur concerné. Ainsi, les paquets 13 et 14, le paquet 15, le paquet 16 et le paquet 17 sont reliés à un circuit 21 par des câbles respectifs 22, 23, 24 et 25.

Selon l'invention, tous les circuits 21 ont une structure identique qui sera décrite par la suite en relation avec la figure 5. Chaque circuit est individuellement relié à une centrale de commande 26, par exemple, par des câbles 27. Les câbles 27 ont été illustrés comme comprenant plusieurs conducteurs indépendants pour amener, à chaque circuit d'alimentation 21, les différentes phases d'alimentation alternative nécessaires ainsi que, le cas échéant, des signaux de commande appropriés fournis par la centrale 26. On notera cependant que seuls les signaux de commande pourraient être individualisés et que les conducteurs d'alimentation polyphasés pourraient être communs aux différents circuits 21, ceux-ci se chargeant alors d'adapter les puissances respectives à fournir à chacun des inducteurs.

Pour des raisons de clarté, les différentes références des inducteurs 9 n'ont été indiquées qu'une seule fois à la figure 4, chaque inducteur ayant une constitution similaire et ne différent des autres que par le sens de circulation du courant comme cela est illustré en figure 3.

La figure 5 représente, de façon très schématique, la constitution d'un circuit d'alimentation 21 d'un inducteur selon la présente invention.

Dans l'exemple de la figure 5, on suppose que chaque phase d'inducteur est alimentée par un signal alternatif basse fréquence dont la valeur efficace du courant est fixée à une valeur prédéterminée en fonction des caractéristiques nominales de freinage souhaité pour la lingotière. Ainsi, le circuit 21 de la figure 5 comprend deux sources de courant 31 et 32 alimentant, par exemple, les câbles 23 et 25 respectivement associés aux paquets de conducteurs 15 et 16 comme cela a été illustré en relation avec la figure 4. Les sources de courant 31 et 32 sont,

selon l'invention, commandables, respectivement, par des signaux 33 et 34 délivrés par des circuits de régulation, respectivement 35 et 36. Chaque circuit 35, 36 mesure la tension entre, respectivement, les conducteurs 22 et 23 et les conducteurs 24 et 25. 5 Ces mesures de tension sont destinées à évaluer la vitesse du métal liquide en regard de l'inducteur correspondant.

Dans le mode de réalisation illustré par la figure 5, chaque régulateur 35, 36 reçoit une consigne 37, 38 de la centrale de commande 26 (figure 4) et se charge d'asservir le courant délivré par les sources 31 et 32 pour permettre une vitesse régulière et équilibrée dans la lingotière. Toutefois, on pourra également prévoir que la régulation soit effectuée directement par la centrale 26, ou qu'une mesure de la tension soit utilisée pour calculer la vitesse afin que celle-ci soit exploitée par la 15 centrale 26.

Bien entendu, on pourra également prévoir que les inducteurs soient alimentés par une tension de valeur prédéterminée commandable et utiliser une mesure du courant dont les variations seront alors fonction de la vitesse, permettant ainsi 20 de réagir sur la source de tension d'alimentation.

La mise en oeuvre pratique du procédé de l'invention, par la réalisation des circuits électroniques où la programmation des outils informatiques nécessaires au calcul, est à la portée de l'homme du métier à partir des indications fonctionnelles données ci-dessus. On notera que la complexité de ce circuit électronique ou des calculs de programmation dépendra de la précision 25 souhaitée pour l'asservissement comme pour tout asservissement classique.

Un avantage de la présente invention est qu'elle permet 30 une mesure de la vitesse du métal liquide dans la lingotière sans contact physique avec le métal liquide.

Un autre avantage de la présente invention est qu'elle se prête particulièrement bien à un asservissement des systèmes de coulée continue dans la mesure où il est très facile de réagir 35 sur le courant ou la tension dans les inducteurs.

Un autre avantage de la présente invention est qu'elle ne nécessite aucune modification des installations classiques de coulées continues à frein électromagnétique à champ glissant, à l'exception des circuits de commande des différents inducteurs.

5 Bien entendu, la présente invention est susceptible de diverses variantes et modifications qui apparaîtront à l'homme de l'art. En particulier, l'adaptation du procédé en fonction du nombre de phases des systèmes de frein électromagnétique à champ glissant est à la portée de l'homme du métier en fonction de
10 l'application et des indications fonctionnelles données ci-dessus. De plus, les valeurs numériques indiquées dans la description qui précède ne l'ont été que pour montrer la faisabilité industrielle de l'invention et n'ont qu'une valeur d'illustration. En outre, on notera que la présente invention peut être
15 mise en oeuvre dans tout système de coulée continue quelle que soit la forme de la lingotière, pourvu que celle-ci ait recours à un système de frein électromagnétique actif à champ glissant.

REVENDEICATIONS

1. Procédé de mesure de la vitesse d'écoulement d'un métal liquide (1) en fusion dans une lingotière (1) équipée d'un frein électromagnétique à champ glissant, caractérisé en ce qu'il consiste à mesurer la tension ou le courant d'au moins une source d'alimentation (31, 32) du frein électromagnétique et à extraire la vitesse d'écoulement de cette information.

2. Procédé selon la revendication 1, appliqué à un frein électromagnétique dont au moins un inducteur (9) comprend deux paquets (16, 17) de plusieurs conducteurs dans une direction verticale (z), caractérisé en ce qu'il consiste à appliquer, pour chaque conducteur, la relation suivante :

$$\text{grad}V = -i(\omega - vk)A - \rho j,$$

où ω représente la pulsation d'excitation alternative du champ glissant, où v représente la vitesse du métal, où k représente le nombre d'ondes du champ magnétique glissant inducteur, où A représente le potentiel vecteur, où ρ représente la résistivité du métal, où j représente la densité de courant d'excitation du conducteur, et où V représente la tension aux bornes de l'inducteur.

3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que la mesure de vitesse est utilisée pour asservir l'excitation des inducteurs (9) sur une valeur prédéterminée.

4. Procédé de régulation d'une vitesse de coulée continue d'un métal en fusion dans une lingotière (1), caractérisé en ce qu'il consiste à asservir la tension ou le courant d'au moins une source d'alimentation (31, 32) d'un frein électromagnétique à champ glissant comportant plusieurs inducteurs (9), sur une mesure du courant ou de la tension dans chaque inducteur.

5. Installation de coulée continue du type utilisant un frein électromagnétique à champ glissant pour organiser l'écoulement d'un métal liquide (1) délivré par deux ouïes (4) d'une buse (3), caractérisée en ce que chaque inducteur (9) du frein électromagnétique est alimenté par un circuit (21) individuel ; et en ce que l'installation comporte des moyens (26, 35, 36) pour régu-

ler la tension ou le courant d'alimentation de chaque inducteur afin de maintenir les vitesses d'écoulement du métal liquide équilibrées entre les deux ouïes.

5 6. Installation selon la revendication 5, caractérisée en ce que chaque circuit d'alimentation (21) de chaque inducteur (9) comprend ses propres moyens de régulation (35, 36) de la puissance d'excitation électromagnétique de cet inducteur.

10 7. Installation selon la revendication 5, caractérisée en ce qu'elle comprend une centrale (26) de commande des circuits d'alimentation (21) des différents inducteurs (9) pour réguler la vitesse d'écoulement du métal liquide.

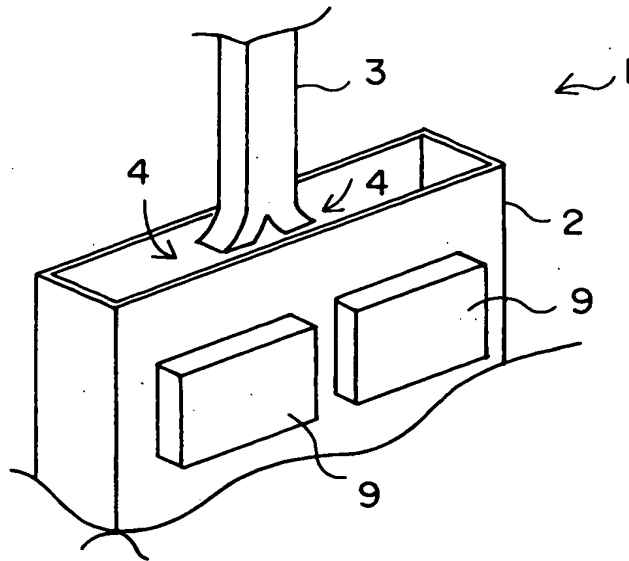


Fig 1

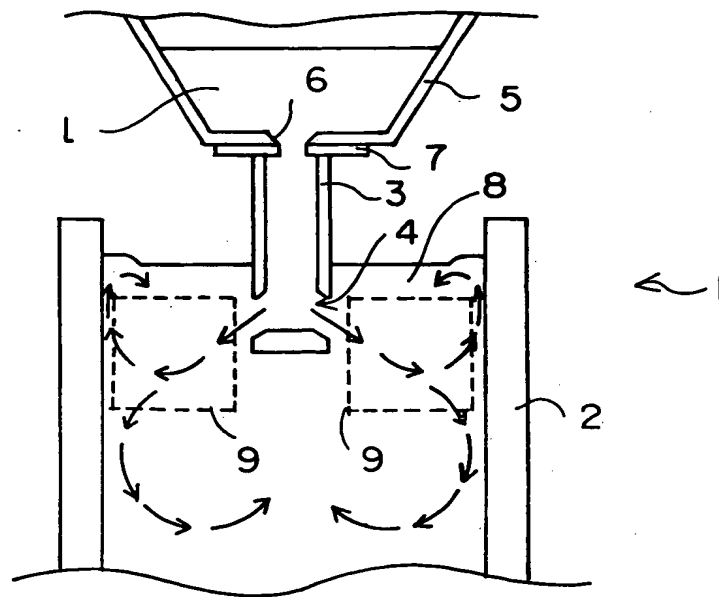


Fig 2

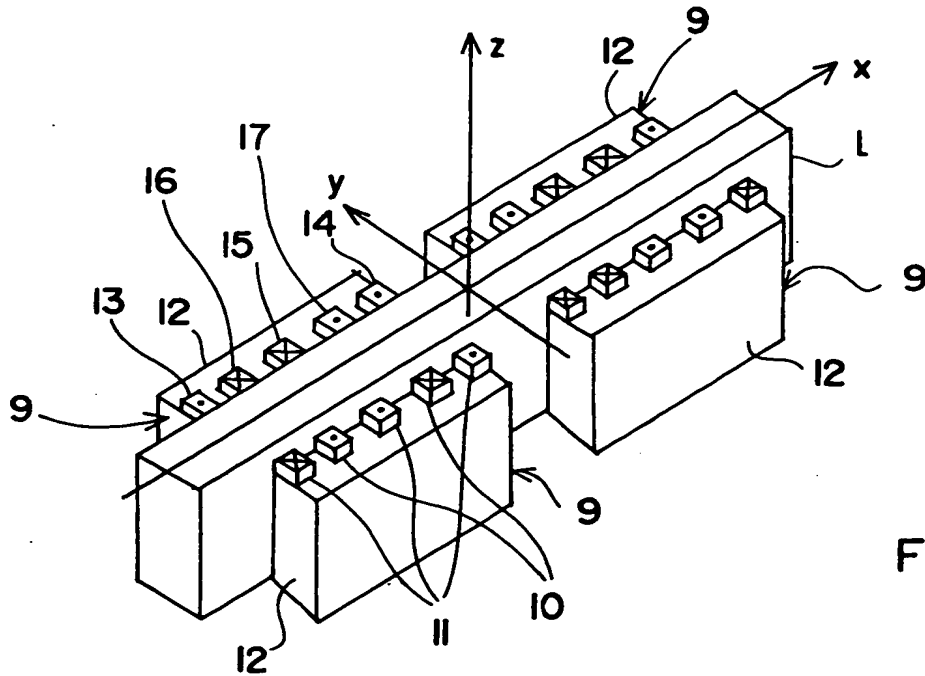


Fig 3

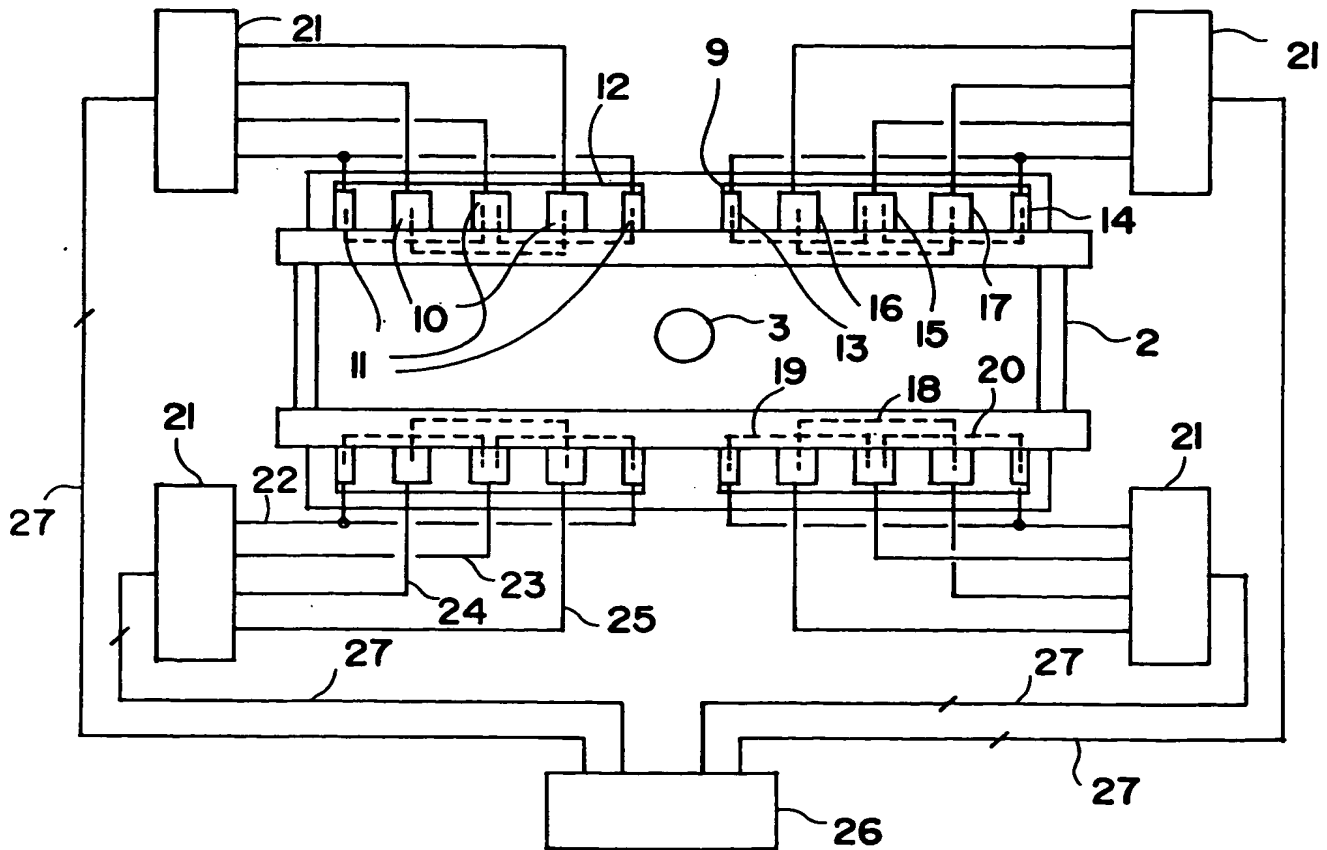


Fig 4

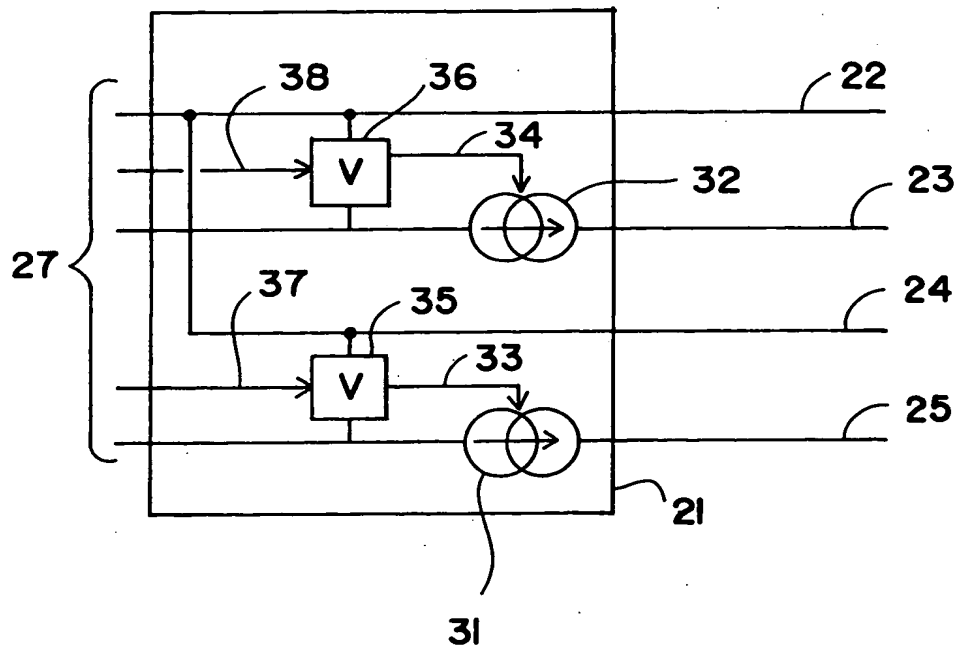


Fig 5

